干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j. issn. 1000 - 6060. 2018. 05. 16

1996—2016 年西藏定结地区风沙地貌格局与变化①

马建军[1]， 潘美慧[1]， 伍永秋[2,3]， 薛雯轩[1]
(1 西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070； 2 北京师范大学环境演变与自然灾害国家教委开放实验室,北京 100875； 3 北京师范大学地理科学学部,北京 100875)

摘 要: 依据 1996—2016 年定结地区 Landsat4 - 5 TM、MSS、Landsat7 ETM、Landsat8 OLI 共 6 期遥感影像,结合野外实地考察,对西藏定结地区风沙地貌特征及近 20 a 来风沙地貌格局动态变化进行了定量研究。结果表明:(1)定结地区风沙地貌类型主要有爬坡沙丘、谷坡灌丛沙堆、新月形沙丘、平沙地及谷底灌丛沙堆,主要沿朋曲河、协林藏布、叶如藏布、吉隆藏布及曲强藏布等河谷呈条带状分布并集中在宽谷段,同时在登么错、强左错、共左错及错母折林等湖泊周围呈小面积零星分布。(2)1996—2016 年定结地区风沙地貌格局变化分为两个阶段:1996—2004 年呈扩张趋势,年转换率为 0.87,面积增加量为 151.2 km^2;2004—2016 年呈逆转趋势,年转换率为 -0.59,面积减少量为 276.6 km^2。整体而言,1996—2016 年总面积转化率为 -0.27,风沙地貌面积呈先扩张后缩减趋势,转移矩阵分析流动沙地向固定、半固定沙地转移较多,这种变化特征与转移方向印证了青藏高原气候暖湿性愈发显著的趋势。

关 键 词: 风沙地貌; 地貌格局; 动态变化; 定结地区
中图分类号: P931.3 **文献标识码:** A **文章编号:**

风沙地貌是广泛分布于干旱、半干旱,甚至部分湿润地区的,由风力作用形成的一种地貌类型[1]。我国风沙地貌主要分布于北方地区,北方地区风沙地貌研究成果显著。已有学者借助遥感手段对北方不同地区风沙地貌类型[2-3]、科尔沁沙地风沙地貌[4-7]、巴丹吉林风沙地貌[8-12]、风沙地貌与风能环境[13-14]、风沙沉积[15-17]等方面作了大量研究,取得了明显的成果。地貌格局指地貌类型的空间组合形式,直观表现为各种图案或称斑图,是沙丘地貌最直观的特征[18],20 世纪 90 年代以来才被地貌学界关注[19],因此对其研究是风沙地貌学界忽视的重要环节[18]。已有的风沙地貌格局研究成果仅对北方地区不同气候带[20]、不同流域沙丘分布格局[21]以及典型河道沙丘空间分布格局[22]等的研究,但对青藏高原地区风沙地貌格局研究较少。

青藏高原是全球气候变化的敏感区[23],风沙地貌分布较为广泛,风沙活动过程对气候变化有着良好的响应[24],因此研究青藏高原风沙活动过程对青藏高原气候变化和全球气候变化有着重要的意义。目前,已有学者对青藏高原风沙档案的形成[25]、"一江两河"(一江两河指雅鲁藏布江、拉萨河、年楚河)流域中部地区沙漠化成因及发展趋势[26]、土地类型及分布规律[27]、沙漠化研究进展与问题[28]以及沙漠化区划与程度[29]做了相关研究,也有学者对青藏高原东缘古近纪[30]和剑川盆地沙漠沉积[31]、青藏高原东北部 15 Ma 以来的风沙沉积[32]、共和盆地风沙沉积和风沙活动历史[33]及风沙活动与气候变化[34]、全新世风沙活动历史与环境演化[35]、冻融荒漠化[36]等做了研究。对青藏高原的风沙活动研究已取得了明显成果,但已有的风沙活动研究主要集中在青藏高原北部、东部、东北部和中部,对藏南河谷地区的研究较少,仅有的研究也多关注于南部定结地区风沙活动[37]及全新世以来的风沙活动研究[38]。

定结地区位于青藏高原南部,喜马拉雅山北麓,现代风沙沉积广泛分布,作为青藏高原边缘地区,是

① **收稿日期:** 2018 - 01 - 25; **修订日期:** 2018 - 04 - 11
基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目课题(2013CB956001);国家自然科学基金重点项目(4133074)
作者简介: 马建军(1990 -),男,甘肃崆峒区人,硕士研究生,主要从事矿产勘查与地质环境方面的研究. E-mail:2311086191@qq.com
通讯作者: 潘美慧(1983 -),女,安徽巢湖人,博士,副教授,主要从事第四纪地质学、矿产勘查与地质环境方面的研究.
E-mail:panmh@nwnu.edu.cn

高原气候变化的敏感区，且该地风沙活动形成与南亚季风有着密切关系，因此研究该地区风沙地貌格局与变化，意义十分重要。3S 技术已成为风沙地貌研究的重要手段[5]，为风沙地貌定量研究提供重要支撑[39]。因此，本文借助遥感手段，通过遥感影像解译判断和实地考察，对定结地区地风沙地貌类型进行统计，确定其分布，并对近 20 a 来风沙地貌格局动态变化进行定量分析，为研究风沙活动和区域环境演化提供科学依据。

1 研究区概况

定结地区位于西藏自治区南部、喜马拉雅山北麓，地理坐标范围为 87°10′～88°15′E，28°10′～28°45′N（图 1），总面积 5 781.8 km^2，行政区划主要包括定结县大部分地区、定日县东部及萨嘎县南部。该地区属喜马拉雅山北麓湖盆区，地势南北高，中间低。东部主要是以错姆折林为中心的高原湖盆区，平均海拔 4 500 m，地形较宽阔平坦；中西部主要是以朋曲河、叶如藏布、协林藏布、曲强藏布和吉隆藏布为主线的河谷区。西南部是喜马拉雅山脉高寒区，海拔在 4 400 m 以上，冰川、雪山广布。气候属于高原温带半干旱季风气候，年平均气温 2 ℃，最冷月为 1 月份，平均气温 -8 ℃；最热月为 7 月份，平均气温 12 ℃，年降雨量 236.2 mm，集中于 7～8 月份，蒸发强烈，年蒸发量 3 000 mm，多数地区干湿季分明，日照时间长，太阳辐射强烈，相对无霜期 100 d，年均持续季风 8 个月，平均风速 1.8～2 $m \cdot s^{-1}$，冬春季节受西风带影响，风力一般可达 4～5 级，最大 10～11 级，强烈的风力作用，是本区风沙活动的主要因素。植被类型主要以高山灌丛、草甸、草原等高山植被为主、土壤类型主要为寒钙土和寒冻土。

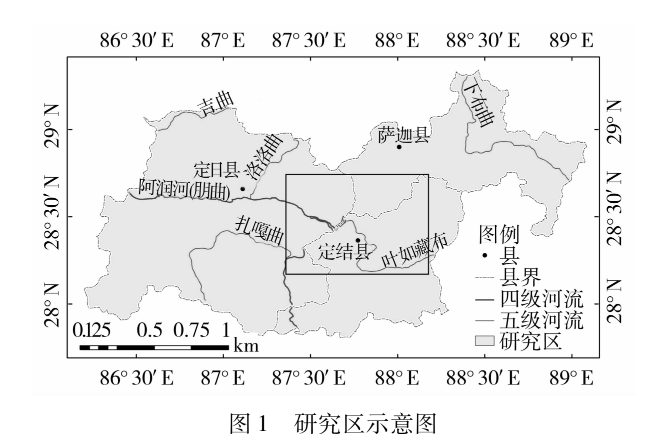


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

2 数据与方法

2011 年 8 月和 2012 年 7 月两次对定结地区进行实地考察，对该地区有风沙地貌分布的区域采取点线结合的调查方法，在参考吴正[40]、李森[41]等对风沙地貌分类基础上对定结地区风沙地貌进行分类、统计。

本文选用 1996、2001、2004、2008、2013 年和 2016 年的 6 期共 12 景覆盖定结地区的遥感影像数据（空间分辨率为 30 m）。借助 ENVI 对该地区遥感影像进行大气校正、图像配准、假彩色合成、图像融合、图像镶嵌、裁剪、分类等。为确保风沙地貌遥感解译准确可靠，在定结地区地面考察的基础上建立风沙地貌遥感解译标志（表 1），进行监督分类，统计分类结果，计算风沙地貌类型的面积。

表 1 风沙地貌遥感解译标志

Tab. 1 Remote sensing image interpreter symbol of aeolian sandy landform

风沙地貌类型	影像解译标志
爬坡沙丘	不规则斑块状，呈白色或灰白色
谷坡灌丛沙堆	不规则斑块，呈浅绿色或浅褐色，其间有沙斑，分布在谷坡
新月形沙丘	形状月牙状，两端呈土黄色，中间呈灰色
平沙地	形状较规则，呈片或条状，土灰色
谷底灌丛沙堆	呈条带状，呈浅绿色或浅褐色，其间有沙斑，分布在谷底

动态变化研究分析，借助计算 1996—2016 年定结地区风沙地貌面积年转化率及年均转化率，研究定结地区风沙地貌风沙演变趋势。年转换率及年均转换率计算公式如下：

$$R = n\sqrt{D/A} - 1 \quad (1)$$

式中：R 为风沙地貌年转换率；n 为测算相隔年限；D 是 2016 年定结地区风沙地貌面积；A 是 1996 年定结地区风沙地貌面积[42]。

3 定结地区风沙地貌特征

3.1 定结地区风沙地貌类型划分

风沙地貌分类是研究风沙地貌活动的基础和首要问题，因此，研究定结地区风沙地貌活动首先要对其风沙地貌进行分类统计。该地区以河谷风沙地貌为主，集中分布于朋曲河谷、协林藏布河谷、叶如藏布河谷、曲强藏布河谷和吉隆藏河谷。

结合李森[41]对雅鲁藏布江河谷风沙地貌分类和描述法,对定结地区风沙地貌类型进行划分(表 2)。

表 2　定结地区风沙地貌类型

Tab. 2　Types of aeolian landform in Dingjie area

风力作用性质分类	下伏地形或床面分类	沙丘固定程度分类	风沙地貌形态分类
风沙地貌	谷坡风沙地貌	谷坡流动沙丘	爬坡沙丘
		谷坡固定/半固定沙丘	谷坡灌丛沙堆
	谷底风沙地貌	谷底流动沙丘	新月形沙丘
			平沙地
		谷低固定/半固定沙丘	谷底灌丛沙堆

3.2　定结地区风沙地貌分布特征

风沙地貌形成的物源条件为地表有大量的松散疏松物质(如沙、粉沙和尘土等)。定结地区境内有朋曲河、叶如藏布、曲强藏布和吉隆藏布等大小河流数条,这些河流冲刷侵蚀、携带大量泥沙,泥沙汇集到较平坦的宽谷形成提供稳定丰富的沙源,因此定结地区的风沙地貌分布与河流位置有着密切的关系(图 2),呈条带状分布于河流沿岸,多分布于河流的一级和二级阶地上。朋曲河谷流动沙丘,固定、半固定沙丘是定结地区风沙地貌发育的主要区域,叶如藏布和吉隆藏布河谷宽谷段也分布着大面积的流动沙丘和固定、半固定沙丘,曲强藏布分布着大面积的固定和半固定沙丘(谷坡、谷底灌丛沙堆等),证明定结地区的风沙地貌形成过程与河流作用有着密切关系。此外,在山地的迎风坡处分布有一定的爬坡沙丘和谷坡灌丛沙堆。

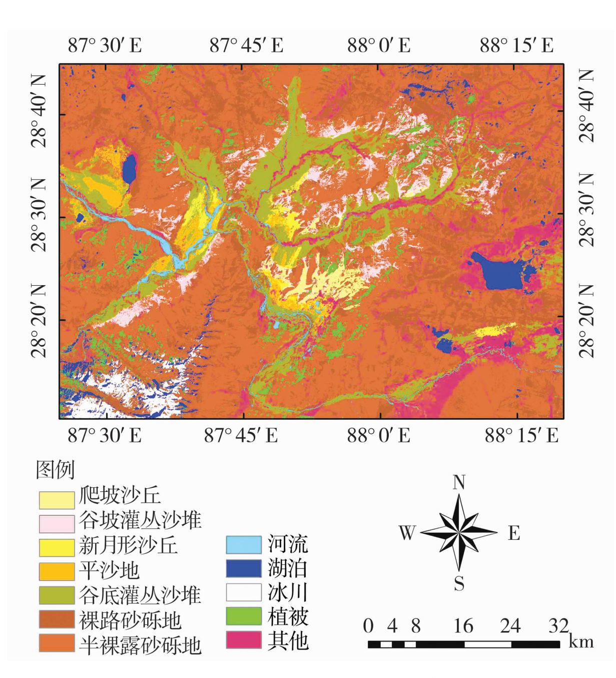


图 2　2016 年定结地区风沙地貌分布图

Fig. 2　Distribution map of aeolian landform in Dingjie area in 2016

4　定结地区各类风沙地貌的面积及其动态变化

4.1　遥感解译结果分析

利用遥感影像解译得到的数据显示,2016 年定结地区风沙地貌总面积 1 551 km^2,占定结地区总面积 26%,其中:爬坡沙丘、谷坡灌丛沙堆、新月形沙丘、平沙地、谷底灌丛沙堆面积分别为 67.1 km^2、184.7 km^2、70.3 km^2、195.0 km^2、1 033.9 km^2,分别占风沙地貌总面积 4.3%、11.9%、4.5%、12.6%、66.7%(表 3)。

利用公式(1)计算得 1996—2016 年定结地区风沙地貌总面积年转换率为 -0.27,表明近 20 a 来定结地区风沙地貌面积减少,减少了 125.4 km^2。根据表 3,在 origin9.0 软件下做出 1996—2016 年风沙地貌各类型及总面积变化曲线,根据风沙地貌变化曲线,定结地区风沙地貌总面积变化分为两个阶段:1996—2004 年为扩张阶段,年转换率为 0.87,增加量为 151.2 km^2;2004—2016 年为逆转阶段,年转换率为 -0.59,减少量为 276.6 km^2。

1996—2016年风沙地貌各类型面积变化情况

表 3　1996—2016 年定结地区风沙地貌面积 / km^2

Tab. 3　Aeolian landform area in Dingjie area during 1996—2016 / km^2

风沙地貌	1996 年	2001 年	2004 年	2008 年	2013 年	2016 年
爬坡沙丘	69.1	76.2	78.0	76.0	64.4	67.1
谷坡灌丛沙堆	273.8	274.5	271.5	285.7	180.2	184.7
新月形沙丘	72.3	76.3	78.6	76.6	75.4	70.3
平沙地	196.1	197.6	208.1	204.1	202.0	195.0
谷底灌丛沙堆	1 065.1	1 053.6	1 191.4	1 125.1	1 134.1	1 033.9
面积总和	1 676.4	1 678.2	1 827.6	1 767.5	1 656.1	1 551.0

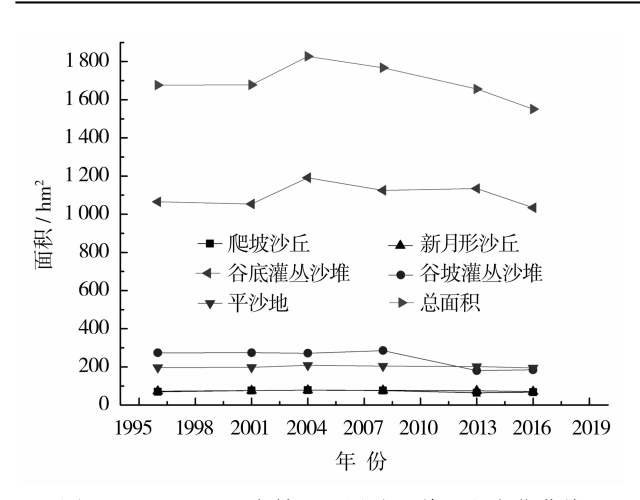


图 3　1996—2016 定结地区风沙地貌面积变化曲线

Fig. 3　Area variation curve of aeolian landform in Dingjie area during 1996—2016

如下，流动沙丘（爬坡沙丘、新月形沙丘、平沙地等）面积变化曲线变化平稳呈缓慢减小趋势，减少量为 5.1 km²；固定/半固定沙丘（谷坡、谷底灌丛沙堆）面积减少量为 120.3 km²。

4.2　转移矩阵分析

为了探讨各风沙地貌类型间的转换，基于图 2 的两个阶段，利用 ENVI 对 1996、2004 年和 2016 年三期遥感影像分类后获得 1996—2004 年增加阶段、2004—2016 年缩减阶段和 1996—2016 年间的 20 a 间的风沙地貌类型转移矩阵（表 4、5 和 6）。1996—2004 年，谷坡风沙地貌类型中爬坡沙丘向谷坡灌丛沙堆转化了 10.1 km²，转移率为 3.9%，谷坡灌丛沙堆向爬坡沙丘转化了 11.5 km²，转移率为 16%；谷底风沙地貌类型中，新月形沙丘向平沙地和谷底灌丛沙各堆转化了 17.7 km² 和 7.7 km²，对应的转移率为 10.6%、1.1%；平沙地转移谷底灌丛沙堆最多，转化了 26 km²，转移率为 3.8%，谷底灌丛沙堆向平沙地转化了 21.1 km²，转移率为 12.6%。2004—2016 年间是风沙地貌面积逆转阶段，爬坡沙丘向谷坡灌丛沙堆转化了 10 km²，转移率为 4%，谷坡灌丛沙堆向爬坡沙丘转化了 14.2 km²，转移率为 19.5%；谷底风沙地貌类型中新月形沙丘向平沙地和谷底灌丛沙堆各转化了 13.8 km² 和 11.2 km²，对应的转移率为 7% 和 1.6%，平沙地向新月形沙丘和谷底灌丛沙堆各转化了 15.8 km² 和 17.5 km²，转移率分别为 17.1% 和 2.5%，谷底灌丛沙堆向平沙地转移面积最大，转化了 79.8 km²，转移率为 40%。1996—2016 年谷坡风沙地貌类型中谷坡灌丛沙堆向爬坡沙丘转移面积最大，转化了 13.6 km²，转移率为 18.9%，谷底风沙地貌类型中谷底灌丛沙堆向平沙地转移面积最大，转化了 79.8 km²，转移率为 42.7%。综上分析，转移总特征为流动沙丘向固定、半固定沙地转移面积较多，固定、半固定沙地向流动沙地转移面积较小，风沙地貌总面积减小。

5　讨 论

定结地区风沙地貌物质来源主要来自于当地河

表 4　1996—2004 年定结地区风沙地貌面积变化转移矩阵 / km²

Tab. 4　Transfer matrix of aeolian landform area in Dingjie area during 1996—2004 / km²

1996	2004 爬坡沙丘	谷坡灌丛沙堆	新月形沙丘	平沙地	谷底灌丛沙堆
爬坡沙丘	39.9	10.1	0.0	0.0	0.0
谷坡灌丛沙堆	11.5	88.0	0.0	0.0	0.0
新月形沙丘	0.0	0.0	32.2	17.7	7.7
平沙地	0.0	0.0	11.2	98.2	26.0
谷底灌丛沙堆	0.0	0.0	10.0	21.1	399.4

表 5　2004—2016 年定结地区风沙地貌面积变化转移矩阵 / km²

Tab. 5　Transfer matrix of aeolian landform area in Dingjie area during 2004—2016 / km²

2004	2016 爬坡沙丘	谷坡灌丛沙堆	新月形沙丘	平沙地	谷底灌丛沙堆
爬坡沙丘	24.5	10.0	0.0	0.0	0.0
谷坡灌丛沙堆	14.2	53.0	0.0	0.0	0.0
新月形沙丘	0.0	0.0	22.1	13.8	11.2
平沙地	0.0	0.0	15.8	33.4	17.5
谷底灌丛沙堆	0.0	0.0	11.7	79.8	281.7

表 6　1996—2016 年定结地区风沙地貌面积变化转移矩阵 / km²

Tab. 6　Transfer matrix of aeolian landform area in Dingjie area during 1996—2016 / km²

1996	2016 爬坡沙丘	谷坡灌丛沙堆	新月形沙丘	平沙地	谷底灌丛沙堆
爬坡沙丘	25.9	6.0	0.0	0.0	0.0
谷坡灌丛沙堆	13.6	64.9	0.0	0.0	0.0
新月形沙丘	0.0	0.0	21.7	15.7	11.1
平沙地	0.0	0.0	13.6	33.5	18.0
谷底灌丛沙堆	0.0	0.0	10.9	71.3	282.9

流冲刷侵蚀沉积物、湖积物质和裸露、半裸露砂砾地风化物。定结地区风沙地貌沿河谷呈条带状分布,沿河谷延伸,并且在山麓迎风坡处有较大面积分布。这种分布特征受河流、气流的影响[43],河流枯水期,携带的冲积物质在风力作用下向河道移动,风力作用减小或遇到阻碍时堆积并形成沙地[44],流动沙地的延伸方向与风向具有一致性,多分布于山麓迎风坡。

风沙地貌形成、变化与气候演变密切相关,风沙地貌面积变化是气候变化的响应。风沙地貌的形成与演化过程、空间组合与形态特征是区域内部环境(大气环流、局地气流等)与外部环境(风况)相互作用的结果[1]。当气候暖湿,风沙活动减弱,植被生长好,沙丘固化,风沙地貌面积缩减。如图 4 所示,1996—2004 年,气温、降水呈波动减少,风速亦减小,该地气候较为冷干,因此风沙地貌面积呈现增加趋势;2004—2016 年气温显著增高,降水波动变化不大,风速增强,印度季风加强增湿明显,因此该时段气候呈暖湿特点,同时,西藏自治区林业局采取生物措施(农田防护林、防风固沙造林、流沙固定等)并辅以水利措施针对西藏河谷地区风沙进行综合整治[45],对风沙面积逆转起到一定作用,因此,2004—2016 年风沙地貌面积显著减少。据学者对青藏高原气候变化的最新研究,近几十年来,青藏高原湿池显著增强[46],树线向更高海拔爬升[47],湖泊面积增大,水位上升[48],多年冻土活动层厚度增大[49],高原草地生长状况良好,*NDVI* 呈上升趋势[50]等研究都表明青藏高原大部分地区呈增温增湿暖湿性气候特征[51]。近 20 a 定结地区风沙地貌呈波动缩减趋势与青藏高原气候变化密切相关,因此,气候增温增湿是定结地区风沙地貌面积缩减的主要因素。

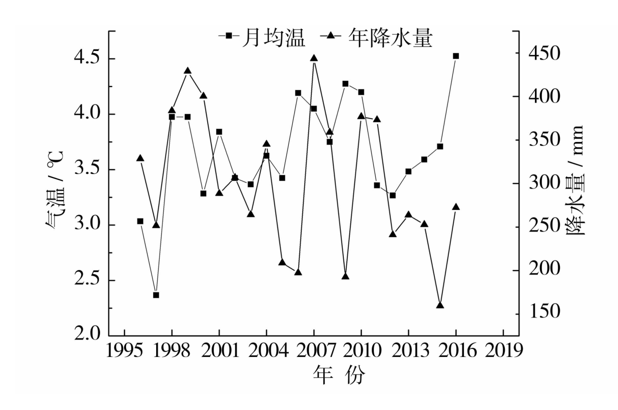


图 4　1996—2016 年定结地区气温、降水变化曲线

Fig. 4　Curves of temperature and precipitation in Dingjie area during 1996—2016

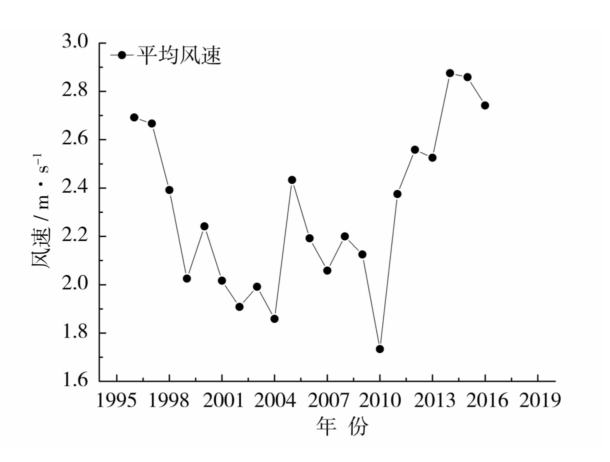


图 5　1996—2016 年定结地区风速变化曲线

Fig. 5　Wind speed variation curve in Dingjie area during 1996—2016

6　结 论

基于 1996—2016 年定结地区遥感影像数据解译和实地考察,对定结地区风沙地貌分布特征以及近 20 a 来动态变化作了分析。得出以下结论:

(1) 定结地区风沙地貌类型主要为爬坡沙丘、谷坡灌丛沙堆、新月形沙丘、平沙地和谷坡灌丛沙堆,沿河谷呈条带状集中分布,在山麓迎风坡处也有较大面积分布,流动沙丘主要分布于朋曲河宽谷、协林藏布河谷宽谷、叶如藏布转折段阶地上,在叶如藏布东北山麓迎风坡处也分布较多;固定、半固定沙丘分布于曲强藏布、吉隆藏布河谷沿岸,并且在湖泊周围分布较多。

(2) 1996—2016 年定结地区风沙地貌总面积变化分为两个阶段:1996—2004 年呈扩张阶段,年转换率为 0. 87,面积增加量为 151. 2 km^2;2004—2016 年呈逆转阶段,年转换率为 -0. 59,面积减少量为 276. 6 km^2。综合而言,总体变化特征呈现出先扩张后逆转的特征,这种变化特征与自然环境因素(大气环流、局地气流、风况等)与人为因素密切相关。通过转移矩阵分析,流动沙丘向固定、半固定沙丘转移面积较大,固定、半固定沙丘向流动沙丘面积较小。该地区风沙地貌变化特征与转移方向是对气候变化的响应,表明青藏高原南部气候暖湿性愈加显著,与全球气候变化具有一致性。

参考文献(References)

[1] 张正偲,董治宝. 风沙地貌形态动力学研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 734 - 747. [ZHANG Zhengcai, DONG Zhibao. Research progress on aeolian geomorphology and morpho-

dynamics[J]. Advances in Earth Science,2014,29(6):734 - 747.]

[2] 刘海江,柴慧霞,程维明,等. 基于遥感的中国北方风沙地貌类型分析[J]. 地理研究,2008,27(1):109 - 118. [LIU Haijiang, CHAI Huixia, CHEN Weiming, et al. A research of aeolian landform in northern China based on remote sensing imagery[J]. Geographical Research,2008,27(1):109 - 118.]

[3] 刘虎俊,徐先英,王继和,等. 黄河上游玛曲地区风沙地貌的类型及其分布[J]. 干旱区地理,2012,35(3):348 - 357. [LIU Hujun, XU Xianying, WANG Jihe, et al. Type and distribution of aeolian goemorphology at Marqu region of upstream Yellow River [J]. Arid Land Geography,2012,35(3):348 - 357.]

[4] 杜会石,哈斯・额尔敦,王宗明. 科尔沁沙地范围确定及风沙地貌特征研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(1):33 - 37. [DU Huishi, EERDUN Hasi, WANG Zongming. Boundary delimitation and characteristics of aeolian sandlandform in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Beijing Normal University, 2017,53(1):33 - 37.]

[5] 王永翠. 科尔沁沙地丘间低地植被过程研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013. [WANG Yongcui. Study on the vegetation process in the interdune lowland of Horqin Sandy Land[D]. Beijing:University of the Chinese Academy of Sciences,2013.]

[6] 王勇. 科尔沁沙地西部影响水河中游右岸沙丘群的沙源分析[D]. 长沙:湖南师范大学,2016. [WANG Yong. Sand source analysis of right dune group in the middle reach of Xiangshui River in western Horqin Sandy Land[D]. Changsha:Hunan Normal University,2016.]

[7] 刘宇慧,韩广,朱孟娜,等. 科尔沁沙地西部响水河河水与其河岸相互作用的初步研究[J]. 干旱区地理,2017,40(1):94 - 101. [LIU Yuhui, HAN Guang, ZHU Mengna, et al. Interactions between Xiangshui River and its banks on the western Horqin Sand Land, northeast China[J]. Arid Land Geography,2017,40(1):94 - 101.]

[8] 闫妍,朱教君,闫巧玲,等. 基于遥感和 GIS 方法的科尔沁沙地边界划定[J]. 地理科学,2014,34(1):122 - 128. [YAN Yan, ZHU Jiaojun, YAN Qiaoling, et al. Demarcation of the Horqin Sandy Land boundary based on remote sensing and GIS technique [J]. Scientia Geographica Sinica,2014,34(1):122 - 128.]

[9] 屈建军,常学礼,董光荣,等. 巴丹吉林沙漠高大沙山典型区风沙地貌的分形特性[J]. 中国沙漠,2003,23(4):361 - 365. [QU Jianjun, CHANG Xueli, DONG Guangrong, et al. Fractal behavior of aeolian sand landform in typical megadune area of Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research,2003,23(4):361 - 365.]

[10] 杨萍,蒋紫蕊. 巴丹吉林沙漠北部风沙地貌形态类型的分区研究[J]. 中国沙漠,1999,19(3):210 - 213. [YANG Ping, JIANG Zirui. Division of aeolian landform configuration in northern Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research,1999,19(3):210 - 213.]

[11] 李恩菊,董治宝,赵景波. 巴丹吉林沙漠典型高大沙山迎风坡粒度特征[J]. 干旱区地理,2011,34(3):471 - 478. [LI Enju, DONG Zhibao, ZHAO Jingbo. Grain size distribution of the aeolian sediments on the stoss slope of a typical mega-dune in the Badain Jaran Desert [J]. Arid Land Geography, 2011, 34(3):471 - 478.]

[12] 闫满存,王光谦,董光荣,等. 巴丹吉林沙漠沙山发育与环境演变研究[J]. 中国沙漠,2001,21(4):361 - 366. [YAN Mancun, WANG Guangqian, DONG Guangrong, et al. Study on mega dunes development and environmental change in Badain Jaran Desert [J]. Journal of Desert Research,2001,21(4):361 - 366.]

[13] 刘陶,杨小平,董巨峰,等. 巴丹吉林沙漠沙丘形态与风动力关系的初步研究[J]. 中国沙漠,2010,30(6):1285 - 1291. [LIU Tao, YANG Xiaoping, DONG Jufeng, et al. A preliminary study of relation between megadune shape and wind regime in the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research,2010,30(6):1285 - 1291.]

[14] 张正偲,董治宝,钱广强,等. 腾格里沙漠西部和西南部风能环境与风沙地貌[J]. 中国沙漠,2012,32(6):1528 - 1533. [ZHANG Zhengcai, DONG Zhibao, QIAN Guangqiang, et al. Wind energy environments and aeolian geomorphology in the western and south-western Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2012,32(6):1528 - 1533.]

[15] 李朝柱,杨小平. 中国北方风沙沉积物气候代用指标对比研究[J]. 第四纪研究,2004,24(4):469 - 473. [LI Chaozhu, YANG Xiaoping. Comparative studies of the climatic indicators inferred from aeolian sediments in the desert regions of northern China[J]. Quaternary Sciences,2004,24(4),469 - 473.]

[16] 周亚利,鹿化煜,弋双文,等. 晚第四纪中国北方沙地风沙沉积的 Zr/Rb 比值特征及意义[J]. 中国沙漠,2013,33(6):1661 - 1669. [ZHOU Yali, LU Huayu, YI Shuangwen, et al. Variation of Zr/Rb ratio from aeolian deposits and its implication in dune field in northern China during the Late Quaternary[J]. Journal of Desert Research,2013,33(6):1661 - 1669.]

[17] 赵爽,夏敦胜,靳鹤龄,等. 毛乌素沙地风沙沉积物磁学特征及其古环境意义[C]//全国第四纪学术大会. 2014:3706 - 3718. [ZHAO Shuang, XIA Dunsheng, JIN Heling, et al. Magnetic properties of eolian sand sediments in the Mu Us Desert and their paleo environmental significance[C]// Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition,2014:3706 - 3718.]

[18] RUBIN D M, HUNTER R E. Bedform alignment in directionally varying flow[J]. Science,1987,237:276 - 278.

[19] 董治宝,苏志珠,钱广强,等. 库姆塔格沙漠风沙地貌[M]. 北京:科学出版社,2011. [DONG Zhibao, SU Zhizhu, QIAN Guangqiang, et al. Aeolian geomorphology of the Kumtagh Desert[M]. Beijing:Science Press,2011.]

[20] 李小妹,严平,钱瑶,等. 不同气候带的河道与沙丘分布格局及其类型划分[J]. 中国沙漠,2017,37(5):821 - 829. [LI Xiaomei, YAN Ping, QIAN Yao, et al. Distribution patterns and its classification at the scale of channel-sand dune in different climate zones[J]. Journal of Desert Research,2017,37(5):821 - 829.]

[21] 李小妹,严平. 中国北方典型流域河道与沙丘空间格局及其动态变化[J]. 干旱区研究,2017,34(6):1436 - 1447. [LI Xiaomei, YAN Ping. Spatial pattern and dynamic changes of channel and sand dune in the typical drainage basins in north China[J]. Arid Zone Research,2017,34(6):1436 - 1447.]

[22] 李小妹,严平,马玉凤. 中国北方不同流域沙漠与河流空间分布格局[C]//全国地貌与第四纪学术研讨会,2013. [LI Xiaomei, YAN Ping, MA Yufeng. Spatial distribution pattern of desert and river in different basins in northern China[C]//A study of the national geomorphic and quaternary academic seminar,2013.]

[23] 陆晴,吴绍洪,赵东升. 1982—2013 年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系[J]. 地理科学,2017,37(2):292 -

300. [LU Qing,WU Shaohong,ZHAO Dongsheng. Variations in alpine grassland cover and its correlation wit hclimate variables on the Qinghai-Tibet Plateau in 1982—2013[J]. Scientia Geographica Sinica,2017,37(2):292 – 300.]

[24] 王训明,李吉均,董光荣,等. 近 50 a 来中国北方沙区风沙气候演变与沙漠化响应[J]. 科学通报,2007,52(24):2882 – 2888. [WANG Xunming, LI Jijun, DONG Guangrong, et al. Wind sand climate evolution and desertification response in northern China's sand areas over the past 50 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2017,52(24):2882 – 2888.]

[25] STAUCH G. Geomorphological and palaeoclimate dynamics recorded by the formation of aeolian archives on the Tibetan Plateau [J]. Earth-Science Reviews,2015,150(2):393 – 408.

[26] 董光荣,董玉祥. 西藏"一江两河"中部流域地区土地沙漠化的成因与发展趋势[J]. 中国沙漠,1994,14(2):9 – 17. [DONG Guangrong,DONG Yuxiang. Study on the cause and development trend of desertification in the midstream region of Yarlung Zangbo River,Tibet[J]. Journal of Desert Research,1994,14(2):9 – 17.]

[27] 张伟民,董光荣. 西藏"一江两河"流域中部地区沙漠化土地类型及其分布规律[J]. 干旱区资源与环境,1994,8(3):80 – 87. [ZHANG Weimin,DONG Guangrong. Study on the cause and development trend of desertification in the midstream region of Yarlung Zangbo River,Tibet[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,1994,8(3):80 – 87.]

[28] 董玉祥. 青藏高原沙漠化研究的进展与问题[J]. 中国沙漠, 1999,19(3):251 – 255. [DONG Yuxiang. Progresses and problems in research on sandy desertification in Qinghai-Xizang Plateau [J]. Journal of Desert Research,1999,19(3):251 – 255.]

[29] 李森,董玉祥,董光荣,等. 青藏高原土地沙漠化区划[J]. 中国沙漠,2001,21(4):418 – 427. [LI Sen, DONG Yuxiang, DONG Guangrong,et al. Regionalization of land desertification on Qinghai-Tebet Plateau[J]. Journal of Desert Research,2001,21(4):418 – 427.]

[30] 江新胜,崔晓庄,伍皓,等. 青藏高原东缘古近纪沙漠及其对季风起源的启示[J]. 沉积与特提斯地质,2012,32(3):54 – 63. [JIANG Xinsheng, CUI Xiaozhuang, WU Hao, et al. The palaeogene deserts and their implications for the origin of monsoons on the eastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau,SW China[J]. Sedimentary Geology & Tethyan Geology,2012,32(3):54 – 63.]

[31] 崔晓庄. 青藏高原东缘剑川盆地古近纪沙漠沉积的确定及其意义[D]. 北京:中国地质科学院,2012. [CUI Xiaozhuang. Determination and significance of Jianchuan Basin in Qinghai Tibetan Plateau in Paleogene sedimentary desert[D]. Beijing:Chinese Academy of Geosciences,2012.]

[32] 王建力,方小敏,李吉均. 青藏高原东北部 15Ma 以来的风沙沉积[J]. 科学通报,1999,44(12):1326 – 1331. [WANG Jianli, FANG Xiaomin,LI Jijun. Aeolian sediment deposition in the northeastern part of the Qinghai Tibet Plateau since 15Ma[J]. Chinese Science Bulletin,1999,44(12):1326 – 1331.]

[33] 刘星星. 青藏高原东北部共和盆地风成沉积与风沙活动历史[D]. 兰州:兰州大学,2013. [LIU Xingxing. The history of aeolian and aeolian activities in the Republic Basin of the northeastern Qinghai Tibet Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University,2013.]

[34] 李明治. 共和盆地末次盛冰期以来的风沙活动历史与气候变化[D]. 兰州:兰州大学,2012. [LI Mingzhi. The history and climate change of wind sand activities in the last glacial period of the Republic Basin[D]. Lanzhou:Lanzhou University,2012.]

[35] 刘星星,宋磊,金彦香,等. 青藏高原全新世风沙活动历史与环境变化[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(6):41 – 47. [LIU Xingxing,SONG Lei,JIN Yanxiang,et al. History of aeolian deposits in Tibetan Plateau and climate change over Holocene[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2013,27(6): 41 – 47.]

[36] 李森,高尚玉,杨萍,等. 青藏高原冻融荒漠化的若干问题——以藏西—藏北荒漠化区为例[J]. 冰川冻土,2005,27(4):476 – 485. [LI Sen,GAO Shangyu,YANG Ping,et al. Some problems of freeze-thaw desertification in the Tibetan Plateau:A case study on the desertification regions of the western and northern Plateau [J]. Journal of Glaciology & Geocryology,2005,27(4):476 – 485.]

[37] PAN M,WU Y,ZHENG Y,et al. Holocene aeolian activity in the Dinggye area (Southern Tibet, China) [J]. Aeolian Research, 2014,12(12):19 – 27.

[38] 潘美慧. 西藏定结地区全新世风沙活动研究[D]. 北京:北京师范大学,2012. [PAN Meihui. Holocene aeolian activity in the Dinggye area (Southern Tibet,China)[D]. Beijing:Beijing Normal University,2012.]

[39] 杜会石,哈斯・额尔敦. 沙丘地貌形态监测与模拟研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2013,49(4):400 – 406. [DU Huishi, EERDUM Hasi. Morphological monitoring and dynamic simulation of dunes[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2013,49(4):400 – 406.]

[40] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京:科学出版社,1987. [WU Zheng. Aeolian geomorphology[M]. Beijing:Science Press,1987.]

[41] 李森,王跃. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌分类与发育问题[J]. 中国沙漠,1997,17(4):342 – 350. [LI Sen,WANG Yue. Classification and development of aeolian sand landform in the Yurlung Zangbo Valley [J]. Journal of Desert Research,1997,17(4):342 – 350.]

[42] 陆诗雷. 土地荒漠化动态监测及其技术路线探讨[J]. 干旱区资源与环境,1998,12(1):8 – 14. [LU Shilei. Dynamic monitoring of land desertification and discussion on its technical route [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,1998,12 (1):8 – 14.]

[43] 李森,董光荣,申建友,等. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌形成机制与发育模式[J]. 中国科学:,1999,29(1):88 – 96. [LI Sen, DONG Guangrong,SHEN Jianyou,et al. Formation mechanism and development model of wind sand geomorphology in the Yarlung Zangbo River Valley[J]. Scientia Sinica(Terrae),1999,29(1): 88 – 96.]

[44] 韩广,张桂芳. 河流演变在科尔沁沙地形成和演化中的作用初探——以科尔沁沙地南部教来河中游沙地为例[J]. 中国沙漠,2001,21(2):129 – 134. [HAN Guang, ZHANG Guifang. Effects of rivers evolution on formation and development of Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research,2001,21(2):129 – 134.]

[45] 程宏,邹学勇,赵延治,等. 西藏河谷地区荒漠化综合整治——以日喀则市江当为例[J]. 自然灾害学报,2003,12(2):40 – 44. [CHENG Hong,ZOU Xueyong,ZHAO Yanzhi,et al. Integrate control of desertification in river valley,Tibet: Taking Jiangdang, Xigaze for example[J]. Journal of Natural Disasters,2003,12(2):

40 – 44.]

[46] 周长艳,邓梦雨,齐冬梅. 青藏高原湿池的气候特征及其变化[J]. 高原气象,2017,36(2):294 – 306. [ZHOU Changyan, DENG Mengyu, QI Dongmei. Climatic characteristics and changes of the wet pool in the Qinghai Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology,2017,36(2): 294 – 306.]

[47] 王亚锋,梁尔源,芦晓明,等. 气候变暖会使青藏高原树线一直上升吗? [J]. 自然杂志,2017,39(3):179 – 183. [WANG Yafeng, LIANG Eryuan, LU Xiaoming, et al. Are treelines advancing in response to climate warming on the Tibetan Plateau? [J]. Chinese Iournal of Nature,2017,39(3): 179 – 183.]

[48] 姜永见,李世杰,沈德福,等. 青藏高原近 40 年来气候变化特征及湖泊环境响应[J]. 地理科学,2012,32(12):1503 – 1512. [JIANG Yongjian, LI Shijie, SHEN Defu, et al. Climate change and its impact on the lake environment in the Tibetan Plateau in 1971—2008[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(12): 1503 – 1512.]

[49] 徐晓明,吴青柏,张中琼. 青藏高原多年冻土活动层厚度对气候变化的响应[J]. 冰川冻土,2017,39(1):1 – 8. [XU Xiaoming, WU Qingbai, ZHANG Zhongqiong. Responses of active layer thickness on the Qinghai-Tibet Plateau to climate change[J]. Journal of Glaciology & Geocryology,2017,39(1):1 – 8.]

[50] 纪迪. 青藏高原气候变化及其 NDVI 的响应[D]. 南京:南京信息工程大学,2012. [JI di. Analysis of the types and characteristics of climate change in the Qinghai Tibet Plateau[D]. Nanjing: Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition),2012.]

[51] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势[J]. 地理学报,2005,60(1):3 – 11. [WU Shaohong, YIN Yunhe, ZHENG Du, et al. Climate Changes in the Tibetan Plateau during the last three decades[J]. Acta Geographica Sinica,2005,60(1):3 – 11.]

Geomorphological pattern and its change of aeolian landform in Dingjie area of Tibet from 1996 to 2016

MA Jian-jun[1], PAN Mei-hui[1], WU Yong-qiu[2,3], XUE Wen-xuan[1]

(1 *College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*;
2 *Open Research Laboratory of Environmental Changes and Natural Disaster of State Education Commission, Institute of Resource Sciences, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*;
3 *Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*)

Abstract: In this paper, we took the Dingjie area, Tibet, China, as the study area, used the Landsat4 – 5 TM, MSSS, Landsat7 ETM, Landsat8 OLI data sets as well as the field observation data in 2016 and 2017. The geomorphologic types and distribution characteristics of the aeolian landform, as well as the change trends, were analyzed using the geographic information tools such as ENVI and GIS combined with GoogleEarth for the visual interpretation of remotely sensed image data, the calculation of annual conversion rate and the analysis of transfer matrix. It is concluded that the change of aeolian landform geomorphological pattern is a positive response to the climate change, which is the main reason for the change. In Dingjie area, the climbing dune, the coppice dune on the valley slope, the crescent dune, the flat sand land and the coppice dune on the valley bottom are mainly distributed like strips in the broad sections of the valleys along the Pengqu, the Xilinzangbu, Yeruzangbu, the Jilongzangbu, and the Quqiangzangbu River. At the same time, there are small dunes distributed sporadically around the lakes including Dengmu Lake, Qiangzuo Lake, Gongzuo Lake and Cuomuzhelin Lake. From 1996 to 2016, the geomorphological pattern of aeolian landform in the Dingjie area was expanded first and then reduced. The area of moving dunes was decreased, while the area of fixed dunes, the semi-fixed dune and the coppice dune was increased. The transition direction is mainly from moving dune to fixed dune, semi-fixed dune and the coppice dune. The characteristics and direction of this change confirmed the trend of climate warming and wet in Qinghai-Xizang Plateau. This study enriches the research contents of aeolian landforms in Dingjie area and provides a theoretical reference for the study of wind – sand geomorphology and the control of wind-sand.

Key words: aeolian landform; geomorphological pattern; dynamic change; Dingjie area